مطالعه‌ی رفتار سایشی پوشش‌های کامپوزیتی آلومینا- تیتانیا تولید شده به‌روش پاشش پلاسمایی*

محمد غیرتی[۱]		محمد حسین فتحی[۲]		علیرضا احمدی[۳]

چکیده

سایش و فرسایش، عامل انهدام بسیاری از قطعات صنعتی است. پوشش‌های سرامیکی تهیه شده به‌روش پاشش پلاسمایی، اغلب باعث بهبود عمل‌کرد سایشی و فرسایشی قطعات صنعتی می‌شود. در این پژوهش، تلاش شد تا با طرّاحی و ایجاد پوشش ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیا به‌روش پاشش پلاسمایی در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما، مُرفولوژی، ریزسختی و چقرمگی پوشش و رفتار فرسایشی محصول مطالعه شود. مشخّصه‌یابی و ارزیابی پوشش به‌کمک پراش پرتوی ایکس و میکروسکُپ الکترونی روبشی انجام شد. خواص کش‌سانی پوشش با ارزیابی میزان تخلخل و میزان فاز آلومینای گاما در ساختار پوشش بررسی شد. افزون بر این، آزمون سختی‌سنجی ویکرز برای اندازه‌گیری ریزسختی پوشش انجام شد. نتایج نشان دادند که خواص کش‌سانی بیش‌ترین تأثیر را بر عمل‌کرد فرسایشی پوشش دارند. برای توان ورودی ۲۸ کیلووات، افزایش ریزسختی و بهبود خواص کش‌سانی پوشش به‌صورت همزمان ملاحظه شد.

واژه‌های کلیدی عمل‌کرد فرسایشی؛ پاشش پلاسمایی؛ آلومینا- تیتانیا؛ ریزساختار؛ خواص کش‌سانی.

The Study of Wear Behaviour of Alumina-Titania Composite Coating Produced by Plasma Spraying Technique

M. Gheirati		M. H. Fathi		A. R. Ahmadi

Abstract

Wear and erosion are the main reasons for destruction of many industrial components. In many cases, ceramic coatings produced by plasma spraying technique improve wear and erosion performance of industrial components. In this study, it was attempted to design and prepare an optimized composite coating of Alumina-Titania via plasma spraying technique using various parameters of plasma input power, and to study the influence of morphology, microhardness and elastic properties of prepared coatings on their erosion behaviour. Characterization of prepared coatings was performed using X-ray diffraction (XRD) technique and scanning electron microscope (SEM). The elastic properties of coatings and the porosity and gamma alumina phase in their structure were also investigated. Vickers hardness test was performed in order to measure the microhardness of coatings. The results showed that the elastic properties have the greatest influence on the erosion performance of coatings. It was also shown that the input power of 28 kW causes an increase in both the microhardness and elastic properties of coatings simultaneously.

Key Word Erosion performance; Plasma sprayed coatings; Alumina–Titania; Microstructure; Elastic properties

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/۱۰/۱۵ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/٤/۱٤ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول، مربی دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنّاوری پیشرفته، کرمان.

(۲) استاد گروه پژوهشی بیومواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان .

(۳) استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

مقدمه

سایش و فرسایش، عوامل انهدام بسیاری از قطعات مهندسی می‌باشند و کنترل و کاهش آن‌ها، از چالش‌های اصلی در صنعت است [1]. روش‌های اصلاح سطح به‌خصوص پوشش‌دهی، از روش‌های کارآمد برای مقابله با آن‌ها در طول شرایط بارگذاری قطعه می‌باشند.

پوشش‌های سرامیکی تولید شده به‌روش پاشش حرارتی به‌طور گسترده‌ای در گستره‌ی وسیعی از برنامه‌های کاربردی، برای ایجاد مقاومت به سایش، فرسایش، حفاظت در برابر خوردگی و عایق حرارتی، استفاده می‌شوند [2]. در میان روش‌های پاشش حرارتی، پاشش پلاسمایی اتمسفری فرایندی تجاری از قابلیّت پوشش‌دهی طیف وسیعی از مواد صنعتی برخوردار است [2,3]. در این روش، از انرژی حرارتی یک قوس الکتریکی و ایجاد یک جت پلاسما برای ذوب و پرتاب ذرات مذاب با سرعت بالا بر روی زیرلایه استفاده می‌شود. دمای گاز پلاسما در این مرحله بسیار بالا می‌رود و حتی می‌تواند به حدود ۳۰۰۰۰ درجه کلوین نیز برسد [4,5].

پوشش‌های پایه آلومینا به‌روش پاشش پلاسمایی تولید می‌شوند [6,7]. شکنندگی این پوشش‌ها و حضور نقص‌های ساختاری از جمله ریزترک‌ها، ذرات جامد و نیمه جامد، چسبندگی ضعیف بین لایه‌های پوشش و حفره‌های تشکیل شده در مرز ذرات تخت شده، خواص پوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهند [8-10]. عمل‌کرد سایشی و فرسایشی پوشش، متأثر از مُرفولوژی پوشش و شرایط و ویژگی‌های ذرات ساینده است [1].

افزودن تیتانیا به پوشش آلومینا، باعث بهبود چقرمگی پوشش و چسبندگی بهتر لایه‌های پوشش می‌شود. اکسید تیتانیوم با دمای ذوب پایین‌تر نسبت به آلومینا، باعث کاهش دمای ذوب پودر ماده‌ی مرکب می‌شود [7,11,12]. نتایج چنگ و همکاران مشخص کرده است که چقرمگی پوشش تأثیر زیادی بر ساختار لایه‌ای و خواص فرسایشی پوشش دارد. نتایج عددی و تجربی آن‌ها نشان می‌دهد که با کنترل چقرمگی پوشش، رفتار فرسایشی پوشش را می‌توان کنترل کرد [1]. افزون بر این، پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهند که انتخاب درست و مناسب متغیرهای پوشش‌دهی همراه با کنترل ریزساختار نهایی پوشش و دمای شعله‌ی پلاسما، خواص پوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهند [13-15]. برای رسیدن به یک ریزساختار مناسب، متغیرهای قابل کنترل زیادی وجود دارند [16]. این متغیرها شامل توان ورودی پلاسما، نوع گاز پلاسما و گاز کمکی پلاسما، فاصله‌ی پوشش‌دهی، گاز حامل پودر، نرخ تغذیه‌ی پودر و زاویه‌ی برخورد ذرات می‌باشند [11]. ایجاد تغییرات اندک در متغیرهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل، تأثیرات زیادی می‌تواند بر ریزساختار و در نتیجه، عمل‌کرد سطحی، سایشی و فرسایشی پوشش داشته باشد [16]. با توجه به ضریب انتقال حرارت پایین مواد سرامیکی، ارزیابی توان ورودی پلاسما و نرخ ورودی گاز پلاسما از مؤثرترین متغیرهای کنترل کننده‌ی شرایط نهایی ذرات و مُرفولوژی پوشش و در نتیجه، عمل‌کرد فرسایشی پوشش می‌باشند [11].

در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی عمل‌کرد فرسایشی پوشش‌های پاشش پلاسما، پوشش ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیا تحت شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما تهیّه شد. توان ورودی پلاسما و زمان ماندگاری ذرات در شعله‌ی پلاسما، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ذوب و سرعت دادن به ذرات قبل از برخورد به سطح زیرلایه می‌باشند [17]. افزون بر این، تأثیر حضور فازهای آلفا و گامای آلومینا، ریزسختی و مُرفولوژی پوشش، به‌عنوان متغیرهای مؤثر بر چقرمگی پوشش، ارزیابی شدند. برای بهبود رفتار کش‌سانی پوشش و دست‌یابی به توزیع مناسب ذرات تیتانیا در ساختار پوشش، از ذرات نانومتری تیتانیا استفاده شد.

حضـور ذرات تیتانیـا در پـودر مـادهی مرکـب باعـث رسیدن به خواص چسبندگی بهتـر پوشـش مـیشـود [12]. چگـونگی توزیـع تیتانیـا و تـأثیر آن بـر رفتـار فرسایشی پوششهای تهیّه شده نیز ارزیابی شد.

مواد و روش انجام تحقیق

نمونههـایی از فـولاد زنـگنـزن ۳۱٦L بـهشـکل استوانه بهقطر ۲۵ میلیمتر بهعنوان زیرلایه برای تهیّـهی پوشـش مـادهی مرکـب آلومینـا- تیتانیـا اسـتفاده شـد. نمونههای تهیّه شده پس از آمادهسازی سطح، بـا ذرات آلومینا Al_2O_3 با مش ۳٦ ذرهپاشی شدند تا زبری معادل ۳/۵۱ میکرومتر ایجاد شود. سپس نمونهها برای چربـی زدایی با اَسِتون شسته شدند و پس از آن، با آب مقطـر تمیز و خشک شدند.

پوشش آلومینا- تیتانیا با ۳ درصـد وزنـی تیتانیـا، بهعنوان پوشش مادهی مرکب برای پوششدهی بهروش پاشش پلاسمایی اتمسفری بر روی زیرلایهای از فـولاد مورد نظـر انتخـاب شـد. ذرات آلومینـا (۱-۲۸-۱۳٤٤، شرکت شارلو با خلوص ۹۹/۹۹ درصد) بهشکل کروی و با اندازهی دانهی ۵۰ میکرون و ذرات تیتانیا (۹-٤۹-۱۲۱۸۸، شرکت زیگماآلدریچ) با انـدازهی دانـهی ۱۰۰ نـانومتر اسـتفاده شـد. ضـخامت تقریبـی پوشـش ۱۵۰ میکرون انتخـاب و پوشـش در پـنج مرحلـهی متـوالی اعمال شد.

پوششدهـی بـا اسـتفاده از تفنـگ پاشـش مـدل Metallization PS50M (شرکت پودر افشـان، شـهرک علمی تحقیقاتی، اصفهان، ایران) انجـام شـد. بـهعلّـت قدرت یونش بـالا و قیمـت پـایینتـر، از گـاز آرگـون بهعنوان گاز پلاسما استفاده شد. برای افزایش رسـانایی گرمایی پلاسما و افزایش آنتالپی فراینـد، گـاز نیتـروژن هم بهعنوان گاز کمکـی بـه محـیط افـزوده شـد [11]. متغیرهای اجرایی پاشش پلاسمایی برای تولید پوشـش مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا، در جدول (۱) آمده است.

از آزمـون پـراش پرتـوی ایکـس (XRD) بـرای شناسایی ساختار فازی پوششها استفاده شد. از پرتوی k_α مس با طول موج ۱/۵٤۰٦۰ آنگستروم استفاده شـد. بـهمنظـور ارزیـابی مُرفولـوژی پوشـش، از دسـتگاه میکروسـکُپ الکترونـی روبشـی (SEM) مـدل VEGA\\TESCAN-LMU مجهز به طیفسنج انـرژی پرتوی ایکس (EDS)سـاخت کشـور جمهـوری چـک استفاده شـد. نمونـههـا قبـل از قرارگیـری در دسـتگاه میکروسکُپ الکترونی روبشی، توسـط لایـهای از طـلا پوشش داده شد. دلیل این کـار، رسـانایی کـم پوشـش آلومینا- تیتانیـا بـود. در ادامـهی کـار، تصـویرهایی بـا بزرگنمایی مناسب برای ارزیابی و مطالعـه مُرفولـوژی سطح تهیّه شد.

جدول ۱ متغیرهای اجرایی پاشش پلاسمایی برای تولید پوششهای مادهی مرکب کامپوزیتی آلومینا- تیتانیا

متغیر	مقدار
توان ورودی پلاسما (kW)	۲٤, ۲۸, ۳۲
فاصله (mm)	۱۱۵
نرخ تغذیه $(\frac{gr}{min})$	۲۰
زاویهی پاشش (deg)	۹۰
سرعت حرکت تفنگ پاشش $(\frac{mm}{s})$	۲۵
سرعت خروج گاز حامل $(\frac{m}{s})$	۳۰

میـزان فـاز آلومینـای آلفـا و گامـای موجـود در ساختار پوشش، بـهطـور نسـبی و بـا اسـتفاده از طـول پیکهای اصلی ایـن فازهـا در الگـوی پـراش پرتـوی ایکس آنها و بهکمک رابطهی (۱) محاسـبه شـد [18]. تعیین فازهای آلومینای آلفا و گامـا، بـا کـارت مراجـع نرمافزار X pert انجام گرفت (کـارت مرجـع شـمارهی ٤٦-۱۲٤۲ برای آلومینای آلفا و کارت مرجع شـمارهی ۱۰-۰٤۲۵ برای آلومینای گاما).

$$DOC(\%) = \frac{I_i}{(I_i+I_j)} \times 100 \qquad (۱)$$

در رابطهی (۱)، I_i طول پیک اصلی فاز آلومینـای آلفا در الگوی پراش پرتوی ایکـس پوشـش و I_j طـول پیک اصلی فاز آلومینای گاما در الگوی پـراش پرتـوی

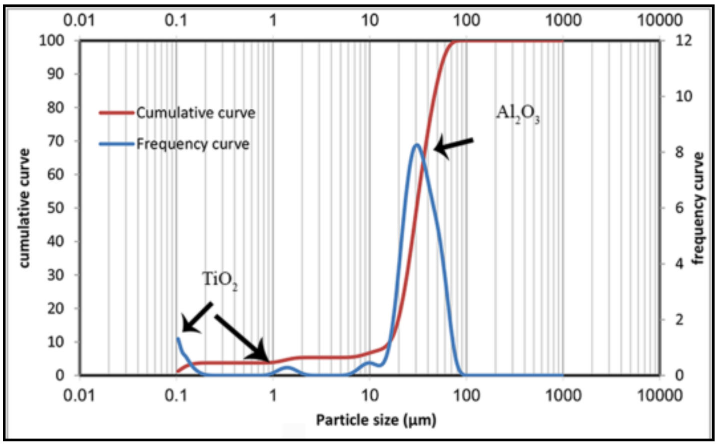
ایکس پوشش می‌باشند.

از آزمون ریزسختی‌سنج ویکرز برای اندازه‌گیری سختی پوشش استفاده شد. این آزمون با دستگاه سختی‌سنج استرواِرس مدل دورامین ۲۰ ساخت کشور آلمان و با اعمال نیروی ۱/۹۶۱ نیوتن به‌مدّت ۱۵ ثانیه، انجام شد. اندازه‌گیری‌ها در ۵ نوبت متوالی تکرار و مقدار میانگین گزارش شد. برای اندازه‌گیری اندازه‌ی دانه‌های پودر ماده‌ی مرکب، از دستگاه تعیین اندازه‌ی دانه‌ی لیزری مدل آنالی‌سِت 22 ساخت شرکت فریش استفاده شد.

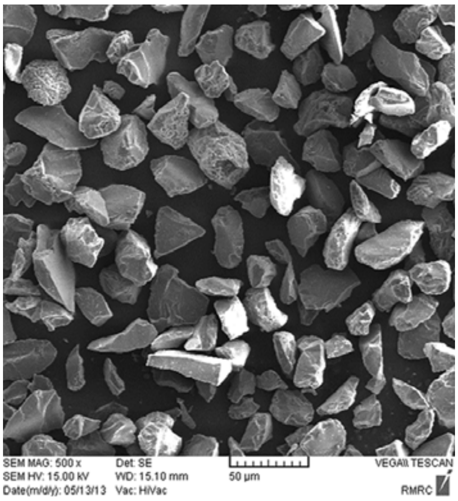
به‌منظور ارزیابی رفتار فرسایشی پوشش، از یک محفظه‌ی بسته که درون آن با دوغابی از ذرات آلومینا با اندازه‌ی متوسط دانه‌ی ٦٠ میکرون و درصد وزنی ۱۵ درصد آلومینا پر شده بود، استفاده شد. نمونه‌های پوشش داده شده توسط یک محفظه‌ی نگه‌دارنده درون محلول ثابت نگه داشته شد و سطح پوشش در تماس با دوغاب قرار گرفت. سرعت چرخش دستگاه ۷۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. کاهش وزن نمونه‌ها با دستگاه مخصوص اندازه‌گیری وزن و با دقّت ۰/۰۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شد. قبل و بعد از اندازه‌گیری، نمونه‌ها با استون تمیز شد و به‌مدّت ۱۰ دقیقه در حمّام التراسونیک قرار گرفت. برای ثابت ماندن غلظت دوغاب، محلول داخل دستگاه بعد از هر دو ساعت تعویض و محلول تازه جای‌گزین آن شد. نتایج به‌صورت نمودار کاهش وزن بر حسب مدّت زمان سپری شده برای هر یک از نمونه‌ها رسم شد.

نتایج و بحث

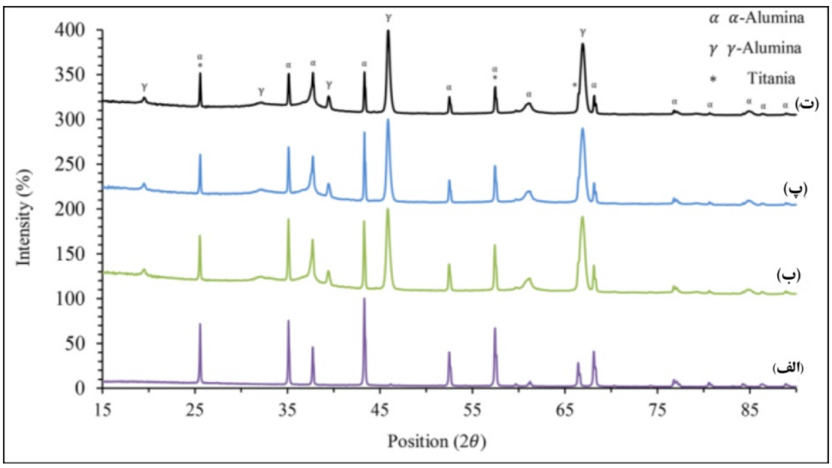
شکل (۱)، توزیع ذرات پودر ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیا تهیّه شده به‌روش دانه‌بندی لیزری را نشان می‌دهد. پیک‌های مربوط به حضور ذرات آلومینا و تیتانیا، در شکل مشخص شده‌اند. اندازه‌ی ذرات آلومینا با استانداردهای پاشش پلاسمایی که برای سرامیک‌ها بین ٦٠ تا ۷۰ میکرون را توصیه می‌کند، تطابق خوبی دارد [19,20]. در شکل (۲)، تصویری از پودر ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیا مورد استفاده در دستگاه پاشش پلاسمایی را نشان می‌دهد. الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به پوشش‌های ماده‌ی مرکب تهیّه شده با توان‌های ورودی مختلف، در شکل (۳) مشخص شده‌اند. افزون بر این، میزان فازهای آلومینای آلفا و گامای موجود در ساختار پوشش‌های ماده‌ی مرکب، در شکل (٤) نشان داده شده است. نتایج الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به پودر ماده‌ی مرکب، نشان می‌دهند که پودر ماده‌ی مرکب اولیّه به‌صورت ۱۰۰ درصد فاز آلومینای آلفا بوده است. با توجه به پایداری شیمیایی زیاد ذرات آلومینا، تنها تغییر ساختاری برای توان‌های ورودی متفاوت پاشش، تبدیل فاز آلومینای آلفا به گاما است. تغییر در دمای شعله‌ی پلاسما، میزان فاز آلفا و گامای موجود در ساختار پوشش را تغییر داده است. این تغییرات ساختاری می‌تواند بر خواص پوشش مؤثر باشد. برای توان‌های ورودی ٢٤ و ٢٨ کیلووات، شرایط از نظر حضور فازهای آلفا و گاما تقریباً یکسان بوده است. با ادامه‌ی افزایش توان ورودی و برای شرایطی با توان ۳۲ کیلووات، افزایش چشم‌گیری در فاز گاما مشاهده می‌شود. افزایش فاز گاما در این حالت، با سرعت زیاد سرد شدن ذرات و هم‌چنین، از دست دادن مقدار زیادی از گرمای پوشش مرتبط است [21]. افزایش فاز گاما باعث بهبود چقرمگی پوشش می‌شود [22]. بهبود چقرمگی پوشش، تأثیر مستقیمی بر رفتار فرسایشی پوشش دارد. با توجه به ساختار فشرده‌ی فاز آلفا، سختی این فاز بیش‌تر از فاز گاما می‌باشد و کاهش فاز آلفا و افزایش فاز گاما می‌تواند باعث کاهش ریزسختی پوشش شود. برای توان ورودی ۲۸ کیلووات، میزان فاز گاما و آلفا در ساختار پوشش به‌شکلی است که افزون بر چقرمگی مناسب، توانایی ایجاد ریزسختی مناسب را نیز دارا می‌باشد.



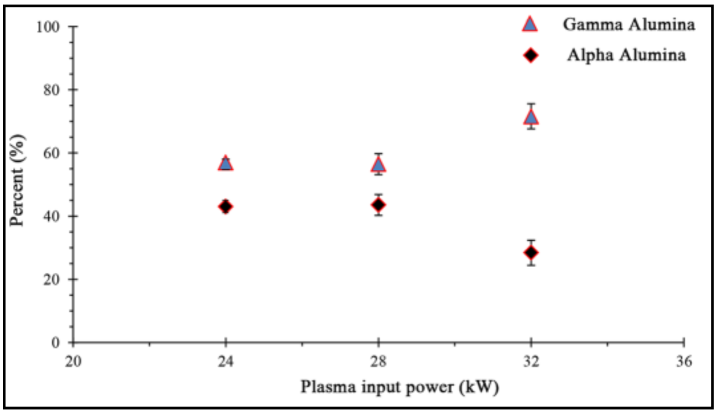
شکل ۱ اندازه‌ی ذرات پودر ماده‌ی مرکب آلومینا– تیتانیای مصرفی در دستگاه پاشش پلاسمایی به‌منظور تهیّه‌ی پوشش‌های ماده‌ی مرکب



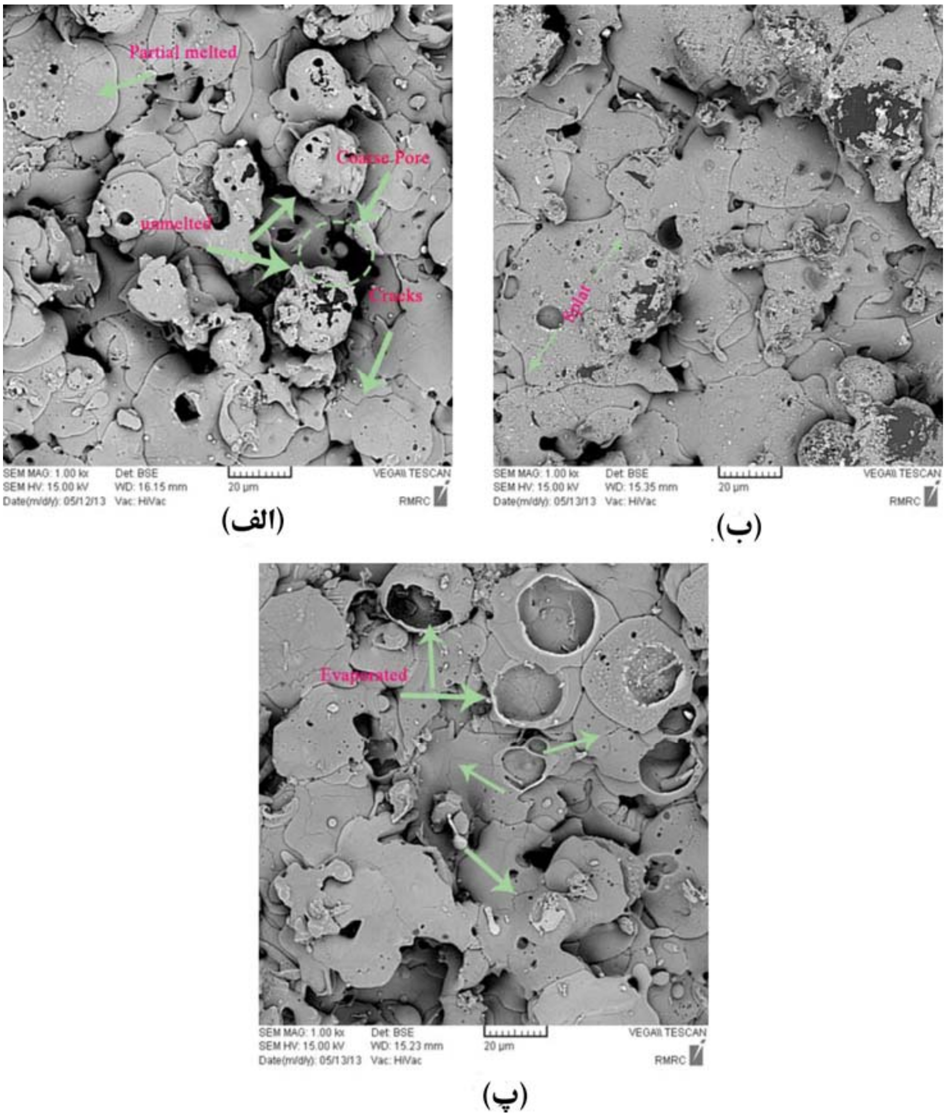
شکل ۲ تصویر میکروسکُپ الکترونی روبشی از ذرات پودر ماده‌ی مرکب آلومینا– تیتانیا



شکل ۳ الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به پوشش‌های ماده‌ی مرکب آلومینا– تیتانیا تهیّه شده با شرایط: **الف**) پودر خام اولیّه، **ب**) توان ورودی ۲٤ کیلووات، **پ**) توان ورودی ۲۸ کیلووات،) توان ورودی ۳۲ کیلووات



شکل ۴ میزان فازهای آلومینای آلفا و گامای موجود در ساختار پوشش‌های ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیا تهیّه شده در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما



شکل ۵ تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی از سطح پوشش ماده‌ی مرکب آلومینا–تیتانیا تهیّه شده تحت شرایط: **الف**) توان ورودی ۲۴ کیلووات، **ب**) توان ورودی ۲۸ کیلووات و پ) توان ورودی ۳۲ کیلووات.

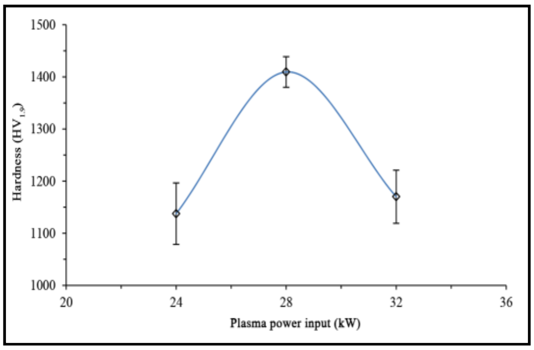
شکل (۵)، مُرفولوژی پوشش مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما را نشان میدهد. تأثیر تغییر توان ورودی پلاسما بر خواص پوشش را میتوان با تغییر میزان تخلخل پوشش و تأثیر بر مُرفولوژی پوشش ارزیابی کرد. این نقصهای ساختاری تا حدود زیادی خواص پوشش را تحت تأثیر قرار میدهند. ریزساختار تأثیر زیادی بر چقرمگی پوشش و در نتیجه، خواص فرسایشی آن دارد. کاهش تخلخل و توزیع همگن آن میتواند بدون تأثیر کاهشی بر ریزسختی پوشش، خواص کشسانی پوشش را تا میزان زیادی افزایش دهد [23]. با اعمال توان ورودی ۲٤ کیلووات، اغلب ذراتی که به سطح رسیدهاند، بهصورت جامد و یا نیمهجامد هستند. دمای پایین شعلهی پلاسما، از دلایل اصلی حضور اینگونه ذرات در سطح پوشش است. برای این توان ورودی، چگالی پلاسما و انرژی منتقل شده به ذرات موجود در شعله کمتر از آن است که بتواند تمام ذرات را ذوب کند. حضور این ذرات در ساختار پوشش باعث افزایش میزان تخلخل در سطح پوشش شده است. بیش اعظم تخلخل، در فصل مشترک ذرات جامد با اسپلیتها تشکیل شده است. بهدلیل حضور این ذرات، تشکیل یک پوشش شکننده با خواص مکانیکی نامطلوب دور از انتظار نیست. در اینحالت، حضور ذرات جامد و نیمهجامد در ساختار پوشش، چسبندگی لایههای میانی پوشش را با مشکل مواجه میکند. تأثیر نامطلوب حضور ذرات جامد و نیمهجامد بر چسبندگی لایههای میانی و همچنین، افزایش شکنندگی پوشش، عملکرد فرسایشی پوشش را نامناسب میکند. انتظار میرود که در اثر برخورد ذرات آلومینای موجود در دوغاب، سازوکار فرسایشی این پوشش، رشد ریزترکها و شکست ترد آن باشد [24]. افزون بر این، سرعت پایین برخورد ذرات به سطح زیرلایه و یا لایههای قبلی پوشش باعث کاهش تراکم پوشش میشود. در مقابل، مُرفولوژی پوشش برای توان ورودی ۲۸ کیلووات بهعلّت دمای مناسب شعلهی پلاسما، از ساختار متراکمتر و با تخلخل سطحی کمتری نسبت به توان ۲٤ کیلووات برخوردار است. افزایش توان ورودی پلاسما با افزایش یونش محیط پلاسما، باعث افزایش دما و سرعت حرکت ذرات موجود در این محیط میشود [25]. در این حالت، بیشتر ذرات رسیده به سطح پوشش بهصورت کامل ذوب شدهاند. این ذرات، توانایی مناسبی برای شکلپذیری و پهنشدگی بر روی سطح پوشش را دارند. دما و سرعت حرکت ذرات، تأثیر زیادی بر میزان پهنشدگی و ساختار نهایی پوشش دارند [25]. شرایط مناسب برخورد ذرات به سطح با افزایش فصل مشترک بین اسپلیتها، باعث چسبندگی مؤثرتر پوشش میشود و افزون بر این، باعث کاهش تخلخل و ذرات جامد و نیمهجامد در ساختار پوشش میشود. بهبود کیفیّت سطح از نقطه نظر حضور حداقل میزان تخلخل و ریزترک در ساختار پوشش برای این توان ورودی پلاسما، عملکرد فرسایشی مناسبی را ایجاد میکند. همچنین، انتظار میرود که بیشتر فاز آلومینای آلفای موجود در ساختار این پوشش با ذراتی مرتبط باشند که در شرایط شعلهی پلاسما ذوب شدهاند و در ادامه و پس از برخورد با سطح، با ساختار بلوری فاز آلفا در پوشش سرد شدهاند. این حالت میتواند به سرعت مناسب حرکت تفنگ پلاسما بر روی سطح زیرلایه مربوط باشد که با تمرکز بر سطح پوشش، مانع از از دست رفتن سریع گرما برای پوشش شده است. مقایسهی فاز آلومینای آلفا برای توانهای ۲٤ و ۲۸ کیلووات، مشخص میکند که فاز آلفا برای توان ورودی ۲٤ کیلووات به ذرات ذوب نشده در ساختار پوشش مربوط میباشد که میتواند خواص کشسانی پوشش را تضعیف کند، در حالیکه فاز آلفا برای توان ۲۸ کیلووات به شرایط مناسب برای تشکیل فاز آلفا از ذرات ذوب شده مربوط است. این ذرات علاوه بر افزایش چقرمگی پوشش بهعلّت شکلپذیری مناسب

در سطح پوشش، باعث افزایش ریزسختی هم می‌شوند. این در حالی است که انتظار می‌رود که با افزایش چقرمگی پوشش، ریزسختی کاهش یابد. افزایش ریزسختی و بهبود خواص کش‌سانی پوشش در این حالت، با بهبود هم‌زمان ریزساختار و ساختار بلورین پوشش مرتبط بوده است.

برای توان ورودی ٣٢ کیلووات، دمای بالای شعله‌ی پلاسما بیش‌تر ذرات رسیده به سطح را تبخیر کرده است. بقایای این ذرات (ذرات میان‌تهی)، در شکل (٥- پ) قابل مشاهده‌اند. برای این توان ورودی از پلاسما نیز سطحی با تخلخل زیاد تولید شده است، ولی کیفیّت پوشش مناسب‌تر از توان ورودی ٢٤ کیلووات است. افزایش میزان فاز آلومینای گاما و بالا رفتن کیفیّت پوشش، عمل‌کرد فرسایشی پوشش را در مقایسه با توان ورودی پلاسما ٢٤ کیلووات بهبود داده است.

ارزیابی تأثیر ریزساختار پوشش شامل اسپلیت‌ها، حفره‌ها، نواحی جزئی ذوب شده و نواحی ذوب نشده، بر خواص فرسایشی پوشش کار پیچیده‌ای است، زیرا این نقص‌های ساختاری به‌صورت مستقل بر رفتار فرسایشی مؤثر نیستند. ارزیابی دقیق تأثیر این عوامل بر رفتار فرسایشی پوشش نیازمند ارزیابی نقش عوامل دیگر از جمله خواص مکانیکی پوشش، می‌باشد [11]. تأثیر توان ورودی پلاسما بر رفتار ریزسختی پوشش، در شکل (٦) نشان داده شده است. در توان ورودی پلاسمای ٢٨ کیلووات، ریزسختی به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده است. خواص مکانیکی پوشش از جمله ریزسختی آن، متأثر از ریزساختار پوشش است [26]. پوشش ایجاد شده در توان ورودی پلاسمای ٢٨ کیلووات، عاری از ریزترک و تخلخل است، در صورتی‌که در پوشش‌های ایجاد شده با توان‌های ورودی ٢٤ و ٣٢ کیلووات، تخلخل و ریزترک در سطح پوشش مشاهده می‌شود. افزون بر این، سرعت بالای ذرات در لحظه‌ی برخورد با سطح زیرلایه و یا لایه‌های قبلی پوشش، باعث افزایش ریزسختی پوشش برای توان‌های ٢٨ و ٣٢ کیلووات در مقایسه با حالت ٢٤ کیلووات شده است.

انحراف معیار مشخص شده در شکل (٦) را می‌توان معیاری از چگونگی توزیع تخلخل در سطح پوشش دانست. این مقدار برای توان ورودی ٢٨ کیلووات، کمینه است. برای این توان ورودی پلاسما، توزیع تخلخل یکنواخت‌تر و کم‌تر است. توزیع یکنواخت تخلخل می‌تواند منجر به بهبود خواص کش‌سانی پوشش شود و رفتار فرسایشی آن را تحت تأثیر قرار دهد.



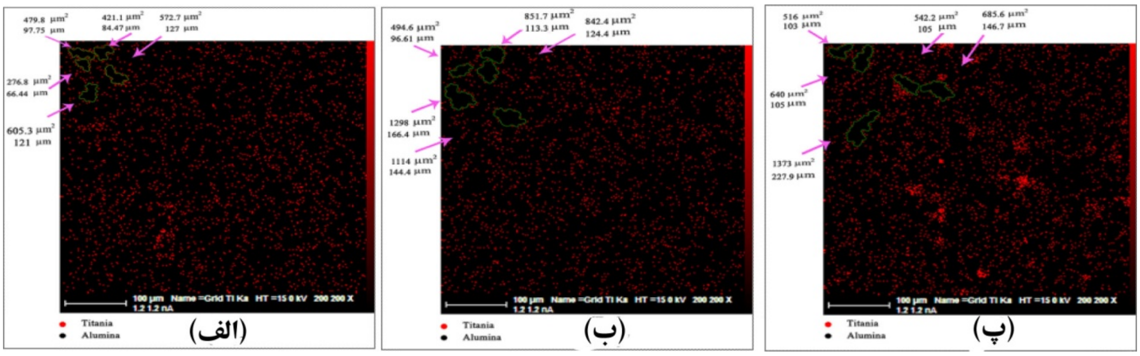
شکل ٦ تغییرات ریزسختی پوشش‌های ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیای تهیّه شده در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما

در این پژوهش و به‌منظور بهبود خواص کش‌سانی پوشش، از ذرات نانوتیتانیا با اندازه‌ی ١٠٠ نانومتر استفاده شده است. ذرات تیتانیا با قرارگیری بین ذرات آلومینا که از چسبندگی ضعیف‌تری برخوردارند، باعث تقویت چسبندگی این ذرات به یک‌دیگر می‌شوند [12]. افزون بر این، افزودن تیانیا به ذرات آلومینا باعث کاهش دمای ذوب پودر ماده‌ی مرکب و تولید پوشش‌هایی با کارایی بهتر و تخلخل کم‌تر می‌شود [21]. با توجه به این واقعیّت که دمای ذوب ذرات تیتانیا کم‌تر از آلومینا می‌باشد، این ویژگی توانایی تشکیل محلولی از ذرات تیتانیا با آلومینا را افزایش می‌دهد و موجب کاهش دمای ذوب پودر می‌شود.

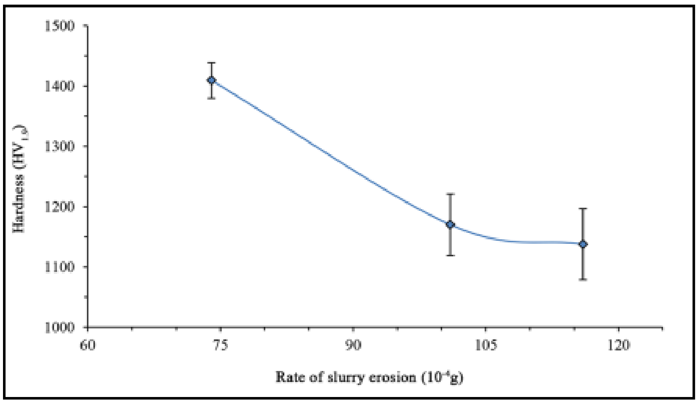
افزون بر این، ذرات تیتانیا با رسانایی حرارتی بهتر خود باعث انتقال حرارت بهتر از محیط پلاسما به پودر ماده‌ی مرکب می‌شوند. فرایند آماده‌سازی پودر به‌شکلی انجام شد که ذرات آلومینا و تیتانیا در یک آسیای مکانیکی پرانرژی و در حالت بدون گلوله قرار گرفتند. این فرایند باعث شد تا ذرات تیتانیا با سطح ذرات آلومینا پیوند مکانیکی برقرار کنند و به‌این ترتیب، ذرات تیتانیا بر روی سطح ذرات آلومینا پوشش خوردند. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، توزیع یکنواخت تیتانیا در ساختار تمام پوشش‌های تهیّه شده، این واقعیّت را تأیید می‌کند. افزون بر این، با مقایسه‌ی تصویرهای این شکل مشخص می‌شود که برای حالت استفاده از توان ورودی ۳۲ کیلووات، کلوخه‌ای شدن جزئی رخ داده است و این می‌تواند با سرعت بالای ذرات در این حالت مرتبط باشد. سرعت بالای پودر مادهی مرکب، احتمال برخورد ذرات را افزایش داده و باعث کلوخه‌ای شدن ذرات پودر شده است. با مقایسه‌ی دقیق‌تر شکل (۷)، الف و ب، می‌توان شکل‌گیری اسپلیت‌ها را نیز مشاهده کرد، با توجه به این واقعیّت که امکان نفوذ ذرات تیتانیا به سمت فاز آلومینای آلفا به‌دلیل ساختار متراکم آن، امکان‌پذیر نیست [22]. در شکل (۷- الف)، ذرات تیتانیا در فاصله‌های بیش‌تری نسبت به یک‌دیگر قرار دارند و این پهن‌شدگی اسپلیت‌ها را نشان می‌دهد. نواحی که در آن‌ها ذرات تیتانیا حضور ندارند را می‌توان فاز آلومینای آلفا در نظر گرفت.

آزمون فرسایش برای پوشش‌های سرامیکی، آزمونی استاندارد برای تخمین عمر پوشش می‌باشد. سایش از نوع فرسایشی، به زاویه‌ی برخورد ذرات به سطح پوشش وابسته است. برای زاویه‌های کم برخورد، ذرات با سازوکار سایشی از سطح پوشش جدا می‌شوند و برای زاویه‌های زیاد، رشد ریزترک‌ها و حفره‌های موجود در سطح پوشش باعث تضعیف عمل‌کرد فرسایشی پوشش می‌شوند. برای سایش از نوع فرسایشی درون دوغاب ذرات آلومینا، احتمال برخورد ذرات با هر زاویه‌ای وجود دارد [24]. در این حالت، آنچه عمل‌کرد فرسایشی را تغییر می‌دهد، ریزساختار، چقرمگی و ریزسختی پوشش است.

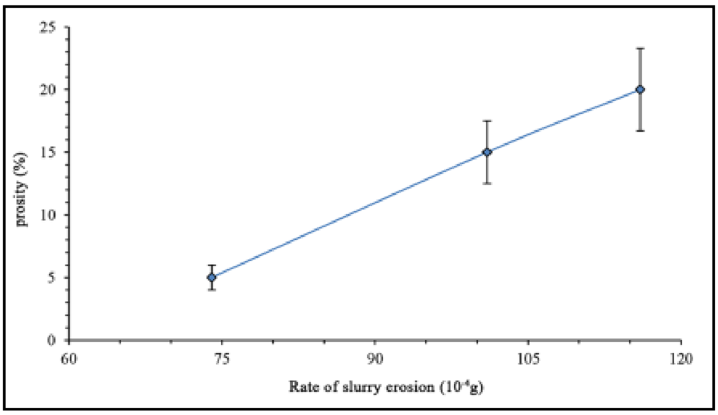
افزایش ریزسختی پوشش، با ممانعت از رشد ریزترک‌ها، باعث بهبود عمل‌کرد فرسایشی می‌شود. ریزترک‌های موجود در سطح پوشش، مکان‌های مناسبی برای شروع فرایند فرسایش هستند [27]. شکل (۸)، ارتباط بین ریزسختی و خواص فرسایشی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ریزسختی خواص فرسایشی پوشش بهبود یافته است. کم‌ترین ریزسختی مربوط به توان ۲۴ کیلووات است که در آن، ضعیف‌ترین رفتار فرسایشی مشاهده شده است. افزون بر ریزسختی، عوامل دیگر از جمله مُرفولوژی پوشش نیز بر رفتار فرسایشی پوشش مؤثرند. حضور ذرات جامد و نیمه‌جامد در ساختار پوشش باعث کاهش چسبندگی ساختار لایه‌ای پوشش می‌شود. افزون بر این، حضور این ذرات در فصل مشترک پوشش و زیرلایه می‌تواند چسبندگی پوشش به زیرلایه را تحت تأثیر قرار دهد. این ذرات به‌دلیل عدم توانایی کافی در شکل‌پذیری مناسب حین برخورد به سطح زیرلایه و یا لایه‌های قبلی پوشش، باعث ایجاد حفره‌ها و فضاهای خالی در لایه‌های میانی پوشش می‌شوند و با کاهش فصل مشترک بین لایه‌های پوشش، باعث کاهش چسبندگی پوشش به زیرلایه می‌شوند. سازوکار فرسایش برای پوشش‌هایی که درصد بالایی از این ذرات دارند، به‌صورت شکست ترد و لایه‌ای شدن می‌باشد. برای توان‌های ۲۴ و ۳۲ کیلووات، حضور این ذرات، تخلخل و در نتیجه‌ی آن، خواص فرسایشی را افزایش داده است. رفتار فرسایشی پوشش‌ها بر حسب کیفیّت سطح، در شکل (۹) آمده است. از آن‌جا که افزایش نقص‌های ساختاری رابطه‌ی مستقیمی با تخلخل موجود در سطح پوشش دارد، تخلخل سطحی معیاری برای ارزیابی کیفیّت سطح در نظر گرفته شده است.



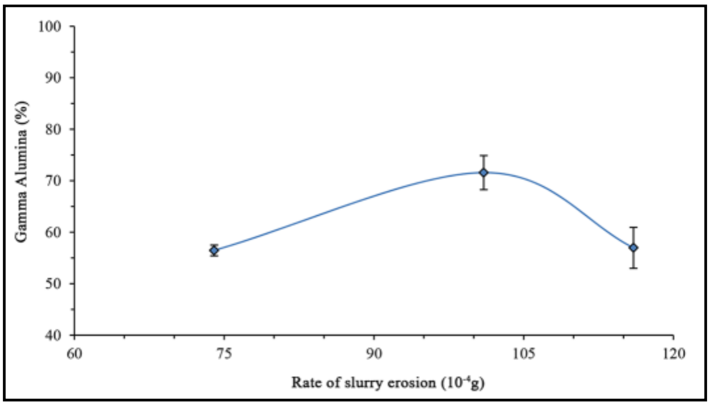
شکل ۷ نحوه‌ی توزیع تیتانیا در ساختار پوشش‌های ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیا تهیّه شده با الف) توان ورودی ۲٤ کیلووات، ب) توان ورودی ۲۸ کیلووات و پ) توان ورودی ۳۲ کیلووات



شکل ۸ نمودار تغییرات ریزسختی با نرخ فرسایش پوشش‌های ماده‌ی مرکب تهیّه شده



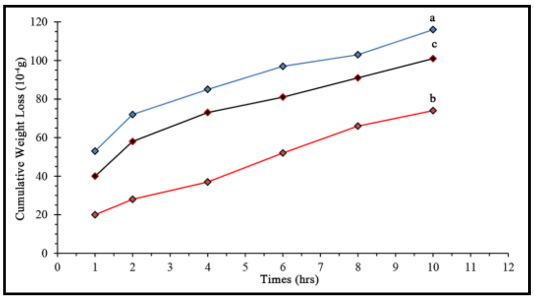
شکل ۹ نمودار تغییرات کیفیّت سطح با نرخ فرسایش پوشش‌های ماده‌ی مرکب تهیه شده



شکل ۱۰ تغییرات میزان فاز آلومینای گامای موجود در پوشش بر حسب نرخ سایش پوشش‌های ماده‌ی مرکب تهیّه شده

خواص کش‌سانی پوشش، عامل عمده در ارزیابی رفتار فرسایشی آن است. حضور درصد مناسبی از فاز گاما در ساختار پوشش و تولید پوشش با خواص همگن می‌تواند کش‌سانی پوشش را بهبود دهد. افزون بر این، کیفیّت سطح نیز از نظر حضور ذرات جامد، تخلخل و پهن‌شدگی ذراتِ رسیده به سطح نیز بر خواص کش‌سانی مؤثرند. در شکل (۱۰)، ارتباط بین میزان فاز آلومینای گامای موجود در پوشش با نرخ سایش پوشش‌های ماده‌ی مرکب نشان داده شده است. افزایش فاز گاما در ساختار پوشش موجب بهبود عمل‌کرد فرسایشی شده است، ولی حضور حداکثری فاز گاما تنها عامل مؤثر بر رفتار فرسایشی نیست. نقش عوامل دیگر از جمله میزان و نوع تخلخل، موجب شده‌اند تا با وجود حضور درصد بیش‌تری از فاز گاما در ساختار پوشش، پوشش ایجاد شده با توان ورودی ۳۲ کیلووات عمل‌کرد فرسایشی ضعیف‌تری نسبت به توان ورودی ۲۸ کیلووات داشته باشد.

شکل (۱۱)، رفتار فرسایشی پوشش‌های ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیای تهیّه شده در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما را نشان می‌دهد. در تمام مراحل آزمون، روند فرسایش پوشش‌ها تقریباً مشابه بوده است. اختلاف موجود در رفتار فرسایشی در شکل (۱۱- الف) و شکل‌های (۱۱- الف و پ)، با تأثیر هم‌زمان ریزسختی، مُرفولوژی و خواص کش‌سانی ارتباط دارد. همان‌طور که گفته شد، با انتخاب درست و مناسب توان ورودی پلاسما، شرایط مناسبی از دما و سرعت ذرات فراهم شده است و در این شرایط، با کاهش تخلخل، افزایش ریزسختی و بهبود خواص کش‌سانی پوشش، عمل‌کرد فرسایشی آن بهبود چشم‌گیری داشته است.



شکل ۱۱ عمل‌کرد فرسایشی پوشش‌های ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیای تولید شده با شرایط الف) توان ورودی ۲۴ کیلووات، ب) توان ورودی ۲۸ کیلووات و پ) توان ورودی ۳۲ کیلووات

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر که با هدف ایجاد پوشش ماده‌ی مرکب آلومینا- تیتانیا توسط فرایند پاشش پلاسمایی و ارزیابی و مشخصّه‌یابی پوشش و بررسی تأثیر توان ورودی پلاسما بر مُرفولوژی، ریزسختی و عمل‌کرد فرسایشی پوشش انجام شد، نشان دادند که انتخاب درست و مناسب توان ورودی پلاسما با ایجاد

دما و سرعت مناسب برای ذرات، خواص کشسانی، ریزسختی و فازهای موجود در ساختار پوشش تحت تأثیر قرار می‌گیرند. بهترین عمل‌کرد فرسایشی در این حالت، با بهترین رفتار کش‌سانی پوشش مرتبط بود. حضور میزان مناسبی از فاز آلومینای گاما و توزیع یکنواخت تخلخل در ساختار پوشش، بیش‌ترین تأثیر را بر خواص کش‌سانی داشت. برای توان ورودی ۲۸ کیلووات، افزون بر خواص کش‌سانی مناسب پوشش، ریزسختی نیز افزایش یافت. افزایش ریزسختی در این حالت، با کاهش تخلخل متناسب بود. برای این توان ورودی، افزایش ریزسختی و بهبود خواص کش‌سانی به‌شکل هم‌زمان صورت پذیرفت.

تشکر و قدردانی

از مساعدت‌های بی‌شائبه‌ی جناب آقای دکتر علیرضا گنجویی، ریاست محترم پژوهشکده‌ی فُتونیک و کلیّه‌ی استادان و کارمندان محترم دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنّاوری پیشرفته تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Li, C.-J., Yang, G.-J. andOhmori, A., "Relationship between particle erosion and lamellar microstructure for plasma-sprayed alumina coatings", *Wear*, Vol. 260, pp. 1166-1172(2006).
2. Psyllaki, P.P., Jeandin, M. and Pantelis, D.I., "Microstructure and wear mechanisms of thermal-sprayed alumina coatings", Materials Letters, Vol. 47, pp. 77-82, (2001).
3. Santa, J.F., Baena, J.C. andToro, A., "Slurry erosion of thermal spray coatings and stainless steels for hydraulic machinery", *Wear*, Vol. 263, pp. 258-264,(2007).
4. Fauchais, P., "Understanding plasma spraying", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37,pp. 86-110, (2004).
5. Pawlowski, L., "The science and engineeringof thermal spray coatings", John Wiley & Sons, (2008).
6. Rico, A., Poza, P. andRodríguez, J., "High temperature tribological behavior of nanostructured and conventional plasma sprayed alumina-titania coatings", *Vacuum*, Vol. 88, pp. 149-154, (2013).
7. Rico, A., Garrido, M.A., Otero, E. andRodríguez J., "An energetic approach to the wear behaviour of plasma-sprayed alumina–13% titania coatings", *Acta Materialia*, Vol. 58, pp. 5858-5870, (2010).
8. Bhandari, S., Singh, H., Kansal, H. andRastogi, V., "Slurry Erosion Behaviour of Detonation Gun Spray Al_2O_3 and Al_2O_3–13TiO_2-Coated CF8M Steel Under Hydro Accelerated Conditions", *Tribology Letters*, Vol. 45, pp. 319-331, (2012).
9. Osorio, J.D., Maya, D., Barrios, A.C., Lopera, A., Jiménez, F., Meza, J.M., and et al., "Correlations Between Microstructure and Mechanical Properties of Air Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings Exposed to a High Temperature", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 96, pp. 3901-3907, (2013).
10. Vijayakumar, K., Sharma, A.K., Mayuram, M.M. andKrishnamurthy, R., "Response of plasma-sprayed alumina–titania ceramic composite to high-frequency impact loading", *Materials Letters*, Vol. 54, pp. 403-413, (2002).

11. Song, E.P., Ahn, J., Lee, S. and Kim, N.J., "Effects of critical plasma spray parameter and spray distance on wear resistance of Al_2O_3–8 wt.%TiO_2 coatings plasma-sprayed with nanopowders", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 3625-3632, (2008).
12. Rico, A., Rodriguez, J., Otero, E., Zeng, P. and Rainforth, W.M., "Wear behaviour of nanostructured alumina–titania coatings deposited by atmospheric plasma spray", *Wear*, Vol. 267, pp. 1191-1197, (2009).
13. Hashemi, S.M., Enayati, M.H. and Fathi, M.H., "Plasma Spray Coatings of Ni-Al-SiC Composite", *Journal of Thermal Spray Technology,* Vol. 18, pp. 284-291,(2009).
14. Enayati, M.H., Fathi, M.H. andZomorodian A., "Characterisation and corrosion properties of novel hydroxyapatite niobium plasma sprayed coating", *Surface Engineering,* Vol. 25, pp. 338-342, (2009).
۱۵. غیرتی م، فتحی م. ح.، احمدی ع.ر.، "بررسی اثر جریان ورودی پلاسما بر مورفولوژی پوشش کامپوزیتی آلومینا–تیتانیا تولیدی به روش پاشش پلاسمایی اتمسفری"، چهاردهمین سمینار ملی مهندسی سطح، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۹۲).
16. Lima, R.S., Kucuk, A. and Berndt C.C., "Bimodal distribution of mechanical properties on plasma sprayed nanostructured partially stabilized zirconia", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 327, pp. 224-232, (2002).
17. Yin, Z., Tao, S., Zhou, X. andDing, C., "Particle in-flight behavior and its influence on the microstructure and mechanical properties of plasma-sprayed Al_2O_3 coatings", *Journal of the European Ceramic Society,* Vol. 28, pp. 1143-1148, (2008).
18. Venkataraman, R. andKrishnamurthy, R., "Evaluation of fracture toughness of as plasma sprayed alumina–13 wt.% titania coatings by micro-indentation techniques", *Journal of the EuropeanCeramic Society,* Vol. 26, pp. 3075-3081, (2006).
19. Mostaghimi J. and Chandra S., "Heat Transfer in Plasma Spray Coating Processes", *Advances in Heat Transfer*, Vol. 40, pp. 143-204, (2007).
20. Fauchais, P., Rat, V., Delbos, C., Coudert, J.F., Chartier, T. andBianchi, L., "Understanding of suspension DC plasma spraying of finely structured coatings for SOFC, Plasma Science", *IEEE Transactions on*, Vol. 33, pp. 920-930, (2005).
21. Yugeswaran, S., Selvarajan, V., Vijay, M., Ananthapadmanabhan, P.V. andSreekumar, K.P., "Influence of critical plasma spraying parameter (CPSP) on plasma sprayed Alumina–Titania composite coatings", *Ceramics International*, Vol. 36, pp. 141-149, (2010).
22. Venkataraman, R., Pabla Singh, S., Venkataraman, B., Das, D.K., Pathak, L.C., Ghosh Chowdhury S. and et al., "A scanning electron microscopic study to observe the changes in the growth morphology of the α phased Alumina–13 wt.% titania coatings during plasma spraying", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 5074-5083, (2008).
23. Lv, H., Zhao, W., An, Q., Nie, P., Wang, J. andChu, P.K., "Nanomechanical properties and microstructure of ZrO_2/Al_2O_3 plasma sprayed coatings", *Materials Science and Engineering: A*, Vol.

518, pp. 185-189, (2009).

24. Singh, V.P., Sil A. and Jayaganthan R., "A study on sliding and erosive wear behaviour of atmospheric plasma sprayed conventional and nanostructured aluminacoatings", *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 584-591, (2011).
25. Fang, J.C., Xu, W.J., Zhao, Z.Y. andZeng, H.P.,"In-flight behaviors of ZrO_2 particle in plasma spraying", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 5671-5675, (2007).
26. Nakamura,T.,Qian, G. andBerndt, C.C.,"Effects of Pores on Mechanical Properties of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings", *Journal of the American Ceramic Society,* Vol. 83, pp. 578-58, (2004).
27. Hawthorne, H.M., Arsenault, B., Immarigeon,J.P., Legoux, J.G. and Parameswaran,V.R., "Comparison of slurry and dry erosion behaviour of some HVOF thermal sprayed coatings", *Wear*, Vol. 229-225, pp. 825-83, (1999).